

PENAPIS OPTIK BERASASKAN KONFIGURASI PENYALUN  
MIKROGEGELANG (MRR) DI ATAS SILIKON-DI-ATAS-PENEBAT UNTUK  
APLIKASI RANGKAIAN WDM

HAZURA BINTI HAROON

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEH IJAZAH  
DOKTOR FALSAFAH

INSTITUT KEJURUTERAAN MIKRO DAN NANOELEKTRONIK  
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA  
BANGI

2014

## **PENGAKUAN**

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang setiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

14 Februari 2014

HAZURA BINTI HAROON  
P48012

## PENGHARGAAN

Syukur Alhamdulillah kepada Allah S.W.T kerana memberikan saya kesihatan yang baik, kecukupan masa dan kematangan fikiran untuk menyiapkan kajian ini. Jutaan terima kasih kepada penyelia utama Prof. Dr. Sahbudin Shaari atas bantuan yang begitu besar, bimbingan, teguran dan nasihat yang begitu berguna sepanjang kajian ini. Tidak lupa juga kepada penyelia bersama saya iaitu Prof. Dato' Dr. Burhanuddin Yeop Majlis dan P.M. Dr. Susthitha Menon di atas kepakaran masing-masing yang banyak membantu saya menyiapkan kajian serta sokongan yang diberikan. Jutaan penghargaan juga diberikan kepada Prof Prakash R. Apte dari Indian Institute of Technology, Bombay untuk pengajaran dan perkongsian ilmu yang dijalankan. Tidak lupa kepada tenaga pengajar Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik (IMEN), UKM khususnya Dr. Norhana Arsad, Dr. Abang Annuar Ehsan dan Dr. Norhesham di atas perbincangan ilmiah yang berterusan sepanjang kajian ini.

Jutaan terima-kasih kepada staf dan rakan-rakan seperjuangan di Pusat Pengajian Siswazah, Makmal Teknologi Fotonik, Makmal MEMS dan Unit Mikroskopi Elektron, UKM khususnya Puan Hanim Abdul Razak, Puan Maisarah Mukhtar, Cik Affa Rozana, Cik Hayati Hussin dan Encik Mohamad Hasnul Naim Abd Hamid di atas bantuan yang diberikan sepanjang menyiapkan tesis ini. Sokongan yang diberikan oleh majikan saya iaitu Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM) serta bantuan kewangan daripada Kementerian Pengajian Tinggi juga amat dihargai. Kajian ini juga adalah di dalam tajaan daripada Universiti Kebangsaan Malaysia di bawah geran UKM-OUP-NBT-119/2011, Industri-2011-015, GUP-2012-012 dan UKM-OUP-NBT-27-118/2012. Kepada semua yang telah terlibat membantu menyiapkan kajian ini secara langsung atau tidak langsung, hanya Allah sahaja yang mampu membalasnya.

Saya mengambil kesempatan ini untuk merakamkan tanda kasih kepada kedua ibubapa saya iaitu ayahanda Haroon bin Awang dan bonda Kamariah binti Yasin kerana telah mendidik serta membesarkan saya dengan kasih sayang serta mendoakan kejayaan saya tanpa jemu. Kepada suami Mohd Faizul bin Mohd Nasri dan anak-anak, Muhammad Adam Nazim dan Muhammad Alif Nazim, terima-kasih di atas kesabaran, pengorbanan dan kasih sayang yang diberikan sepanjang bertungkus lumus menyiapkan tesis ini.

Sesungguhnya kita hanya mampu merancang tetapi segalanya adalah ditangan-Nya. Al-fatihah buat sahabat yang menemani sepanjang pahit manis perjuangan ini, almarhumah Mardiana Bidin. Kehilangan yang pasti dirindui.

## ABSTRAK

Penapis optik pasif berasaskan penyalun mikrogegelang (MRR) sebagai elemen utama litar bersepadu fotonik dibangunkan bagi tujuan aplikasi fotonik silikon pada masa hadapan. Penapis MRR digunakan secara meluas kerana mempunyai kelebihan seperti saiz yang kompak, kehilangan sisipan (IL) yang rendah dan mudah diintegrasikan bagi tujuan fabrikasi. Kajian terkini menjurus kepada penghasilan peranti MRR dengan nilai faktor kualiti (Q) yang tinggi dengan nilai IL yang rendah. Juga, kurang penyelidikan dijalankan bagi menguji kesesuaian MRR bagi aplikasi sistem Pemultipleks Pembahagian Panjang Gelombang (WDM). Substrat silikon-di-atas penebat (SOI) digunakan kerana kematangan teknologi pemfabrikasian serta perbezaan indeks biasan yang tinggi. Tesis ini menghuraikan pemodelan secara teori, simulasi, pengoptimuman dan pencirian penapis MRR di atas substrat SOI, serta prestasi penapis tersebut di dalam sistem rangkaian optik. Objektif utama kajian ini adalah membangunkan penapis optik MRR yang baru berasaskan SOI bagi aplikasi rangkaian WDM. Bagi mencapai objektif tersebut, model penapis pasif MRR dibangunkan berdasarkan teori penggandingan mod (CMT) yang digabungkan ke dalam model matriks pemindahan (TMM). Kaedah ini memberikan gambaran analitik penapis MRR dari segi aliran tenaga dan membina fungsi pemindahan tenaga di antara pandu gelombang. Ketepatan pemodelan peranti ditentukan dengan perisian simulasi yang menggunakan kaedah Perbezaan Terhingga Domain Masa (FDTD) daripada perisian RSoft Inc. Tiga rekabentuk penapis dikaji secara mendalam iaitu penapis MRR tunggal, penapis berganda susunan selari simetri (SPCMRR), serta rekabentuk penapis MRR yang julung-julung kali diperkenalkan, dinamakan sebagai penapis MRR selari tidak simetri (APCMRR). Tujuan APCMRR dibangunkan adalah bagi mempertingkatkan prestasi penapis dengan rekabentuk sedia ada. Nilai teori Q adalah 700 dengan IL 0.27 dB bagi penapis MRR bermod tunggal, di mana perbezaan di antara nilai teori dan simulasi adalah baik iaitu kurang daripada 5%. Bagi penapis SPCMRR pula, Q yang terhasil adalah 578 dengan kehilangan sisipan (IL) 2.48 dB dan sisihan di antara teori dan simulasi juga sekitar 5 %. Prestasi penapis dipertingkatkan dengan pembangunan APCMRR di mana nilai Q mencapai 1557 dengan IL yang minimum iaitu 0.21 dB. Kesemua rekabentuk peranti yang dibangunkan dioptimumkan menggunakan kaedah Taguchi. Pengoptimuman penapis MRR menggunakan kaedah Taguchi ini merupakan kajian yang pertama seumpamanya. Empat faktor kawalan yang dipertimbangkan adalah lebar pandu gelombang mikrogegelang dan pandu gelombang bas, jejari mikrogegelang, ketinggian pandu gelombang dan saiz jurang. Analisis varians (ANOVA) telah digunapakai bagi menganalisis perubahan Q dan prestasi IL di bawah set kombinasi faktor kawalan yang berbeza. Nilai Q bagi penapis APCMRR meningkat kepada 1711 dan nilai IL menurun kepada 0.13 dB selepas dioptimumkan. Model peranti yang dibangunkan telah diuji di dalam rangkaian optik WDM menggunakan perisian Optisystem dari Optiwave, yang merupakan satu cubaan baru untuk menilai prestasi rekabentuk peranti di peringkat sistem. Bukti gambarajah mata yang jelas pada kadar ralat bit (BER) kurang daripada  $10^{-9}$  dicapai dan membuktikan bahawa peranti APCMRR yang baru dibangunkan ini sesuai digunakan di dalam sistem rangkaian optik WDM.

## **SILICON-ON-INSULATOR (SOI) OPTICAL FILTERS BASED ON MICRORING RESONATOR (MRR) CONFIGURATIONS FOR WDM OPTICAL NETWORK APPLICATIONS**

### **ABSTRACT**

The development of passive microring resonator (MRR) optical filters as a key element of practical photonic integrated circuits is demonstrated for future silicon photonics applications. MRR filters are favorable in such applications due to its superior features such as ultracompact size, low insertion loss (IL) and easy integration of fabrication. Recent studies focused on the production of MRR devices with high quality factor (Q) and low IL. Furthermore, lacks of research have been done to test the suitability of the device in the Wavelength Division Multiplexing (WDM) applications. Silicon-on-insulator substrates are chosen due to the maturity of fabrication technology and high indexed contrast. This thesis outlines the theoretical modeling, simulation, optimization and characterization of a MRR filter on silicon-on-insulator (SOI) substrate. The main objective is to develop a new SOI-based MRR optical filter for WDM applications. To achieve the objective, the MRR filter is modelled using coupled-mode theory (CMT), incorporated in a transfer matrix model (TMM). This approach gives an analytical description of the MRR filter in terms of energy flow in the device and develops the transfer function of energy between waveguides. The accuracy of the model was compared with device simulation using Finite Difference Time Domain (FDTD) software by RSoft Inc. Three filter designs has been investigated extensively, which is single MRR filter, symmetrical parallel cascaded MRR filter (SPCMRR) and filter design that was introduced for the first time, named as asymmetrical parallel cascaded MRR filter (APCMRR). APCMRR was developed to enhance the performance of existing filter designs. The Q-factor value for a single mode, single MRR filter was 700 with IL of 0.27 dB, therefore achieving deviations of less than 5 %. SPCMRR produced calculated Q- factor of 578 with insertion loss (IL) 2.48 dB and deviation around 5 %, as well. The performance of the MRR filter was enhanced with the development of APCMRR, where the Q-factor reached 1557 with the IL of 0.21 dB. The developed devices were also optimized using Taguchi method. The optimization of the MRR filter is the first of its kind. Four control factors considered were width of rings and channels, radii of the microring, upper rib waveguide height and gap size. The analysis of variance (ANOVA) was adopted to analyze significant trends occurring on the Q and IL performance under different set of control factor combinations. Upon optimization, the value of the Q value improved to 1711 and IL decreased to 0.13 dB. The performance of the developed device model was tested on a WDM optical network using Optisystem software from Optiwave which is a novel attempt to evaluate a new device design at a system level. Clear eye diagram openings at bit-error-rates (BER) of less than  $10^{-9}$  was achieved and proved that the APCMRR filter is capable to be used in optical network systems.

## KANDUNGAN

	<b>Halaman</b>
<b>PENGAKUAN</b>	ii
<b>PENGHARGAAN</b>	iii
<b>ABSTRAK</b>	iv
<b>ABSTRACT</b>	v
<b>KANDUNGAN</b>	vi
<b>SENARAI JADUAL</b>	x
<b>SENARAI RAJAH</b>	xiii
<b>SENARAI SIMBOL</b>	xviii
<b>SENARAI SINGKATAN</b>	xxii
<b>BAB I      PENGENALAN</b>	
1.1      Latar Belakang	1
1.2      Motivasi Kajian	2
1.3      Objektif Kajian	5
1.4      Skop Kajian	5
1.5      Metodologi Kajian	7
1.6      Organisasi Tesis	8
<b>BAB II      TEORI DAN KAJIAN KEPUSTAKAAN</b>	
2.1      Pengenalan	11
2.2      Penapis Optik di dalam Sistem WDM	11
2.2.1   Satah jeriji	12
2.2.2   Interferometer Fabry-Perot	13
2.2.3   Jeriji pandu gelombang tersusun (AWG)	14
2.2.4   Jeriji gentian Bragg	15
2.2.5   Interferometer Mach-Zehnder (MZI)	16
2.2.6   Penyalun mikrogegelang (MRR)	17
2.3      Komponen MRR di dalam Rangkaian Optik WDM	18
2.4      Teknik Pengekodaan Data Bagi Sistem Komunikasi Optik	19
2.5      Penyelidikan dan Aplikasi Penyalun Mikrogegelang	21
2.6      Mekanisma Operasi Penyalun Mikrogegelang	25
2.7      Ciri-Ciri Sambutan Spektrum Penyalun Mikrogegelang	28

2.8	Jenis Geometri Penyalun	29
2.9	Pemilihan Silikon Bagi Tujuan Pemfabrikasian MRR	32
2.10	Pemfabrikasian Peranti Semikonduktor	32
2.10.1	Fotolitografi sinar ultraungu	33
	2.10.2 Litografi alur elektron (EBL)	33
	2.10.3 Punaran basah	34
	2.10.4 Punaran kering	35
	2.10.5 Sistem laser cetakan terus (LDWS)	36
2.11	Konfigurasi Gandingan Pemfabrikasian Secara Lateral dan Vertikal	38
2.12	Ringkasan	39
<b>BAB III</b>	<b>METODOLOGI KAJIAN</b>	
3.1	Pengenalan	40
3.2	Pemodelan Peranti Penyalun	42
3.3	Pengoptimasian Penapis MRR Menggunakan Kaedah Taguchi	44
3.4	Pencirian Prestasi Penapis MRR di dalam Rangkaian WDM	46
3.5	Pemfabrikasian Penapis MRR di atas Silikon-di atas- Penebat	47
	3.5.1 Proses pemfabrikasian penapis MRR secara Punaran Kering	47
	3.5.2 Proses pemfabrikasian penapis MRR secara EBL	49
3.6	Ringkasan	49
<b>BAB IV</b>	<b>PEMODELAN ANALITIK PERANTI MRR</b>	
4.1	Pengenalan	50
4.2	Pemodelan Penapis MRR	51
	4.2.1 Model analitik penentuan nilai pekali gandingan terarah	52
4.3	Matriks Pemindahan Peranti MRR Tunggal	57
4.4	Matriks Pemindahan Mikropenyalun Bertertib Tinggi Susunan Selari Simetri (SPCMRR)	59
4.5	Pengaturcaraan dan Perantaramuka Grafik Pengguna Menggunakan Perisian MATLAB	60
4.6	Pencirian Penapis MRR Tunggal	62
4.6.1	Kesan variasi jarak julang dan lebar pandu gelombang ke atas parameter MRR	64
4.6.2	Kesan variasi jejari MRR ke atas parameter MRR	69

4.7	Pencirian Penapis MRR Bertertib Tinggi Susunan Selari Simetri (SPCMRR)	71
4.8	Pemodelan Penapis MRR Bertertib Tinggi Susunan Selari Tidak Simetri (APCMRR)	73
4.9	Pencirian APCMRR	77
4.10	Kesimpulan	79
<b>BAB V</b>	<b>HASIL KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN</b>	
5.1	Pengenalan	81
5.2	Perincian Simulasi Penapis MRR Tunggal	82
5.2.1	Perincian hasil simulasi kesan variasi struktur geometri MRR	85
5.3	Perincian Simulasi Penapis SPCMRR dan APCMRR	88
5.4	Pengoptimasian Parameter Rekabentuk Menggunakan Kaedah Taguchi	89
5.5	Keputusan Pengoptimasian Rekabentuk Penapis MRR Tunggal	92
5.5.1	Ujian pengesahan optimasi rekabentuk penapis MRR tunggal	97
5.6	Keputusan Pengoptimasian Rekabentuk Penapis SPCMRR	99
5.6.1	Ujian pengesahan optimasi rekabentuk penapis SPCMRR	103
5.7	Keputusan pengoptimasian rekabentuk penapis APCMRR	105
5.7.1	Ujian pengesahan optimasi rekabentuk penapis APCMRR	109
5.8	Perbandingan Hasil Optimasi Penapis MRR	110
5.9	Pencirian Struktur Pandu Gelombang Hasil Proses Pemfabrikasian Peranti	112
5.9.1	Pencirian pemfabrikasian menggunakan RIE	112
5.9.2	Pencirian pemfabrikasian menggunakan litografi alur elektron (EBL)	118
5.10	Kesimpulan	120



<b>BAB VI</b>	<b>KAJIAN PRESTASI PENAPIS MRR DI DALAM RANGKAIAN WDM</b>	
6.1	Pengenalan	123
6.2	Sistem WDM Gentian Mod Tunggal bagi Penghantaran Data Digital	125
	6.2.1 Pemancar	125
	6.2.2 Talian optik	126
	6.2.3 Talian penerima	126
6.3	Pengujian Peranti Penapis di dalam Rangkaian WDM	127
6.4	Pencirian Penapis MRR di dalam Sistem WDM bagi Penghantaran Isyarat Secara Digit	130
	6.4.1 Hasil gambarajah mata pada panjang talian optik yang berbeza	131
	6.4.2 Perbezaan prestasi penapis APCMRR sebelum dan selepas optimasi	132
	6.4.3 Kesan jumlah saluran terhadap prestasi rangkaian WDM	134
	6.4.4 Kesan kadar data terhadap prestasi rangkaian WDM	135
	6.4.5 Kesan kuasa masukan terhadap prestasi rangkaian WDM	137
	6.4.6 Perbandingan prestasi pelbagai penapis MRR di dalam rangkaian WDM 8 saluran	137
6.5	Kesan Ketar Masa Terhadap Prestasi Rangkaian Optik WDM	139
	6.5.1 Pengukuran ketar masa di dalam sistem digit	141
6.6	Kesimpulan	145
<b>BAB VII</b>	<b>KESIMPULAN DAN CADANGAN MASA HADAPAN</b>	
7.1	Kesimpulan Kajian	147
7.2	Sumbangan Kajian	149
7.3	Cadangan Masa Hadapan	149
<b>RUJUKAN</b>		151
<b>LAMPIRAN</b>		
A	SENARAI PENERBITAN	160
B	KOD PENGATURCARAAN MATLAB	164

## SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
2.1	Ciri-ciri lazim pelbagai penapis optik	17
2.2	Ringkasan perbandingan pelbagai teknik pemfabrikasian	38
3.1	Nilai parameter piawai proses pemfabrikasian SOI menggunakan EBL	49
4.1	Prestasi penapis MRR pelbagai konfigurasi	79
5.1	Parameter-parameter bagi simulasi FullWAVE	82
5.2	Perbandingan hasil simulasi dan teori analitik penapis MRR tunggal	85
5.3	Perbandingan hasil simulasi dan teori analitik penapis SPCMRR	89
5.4	Perbandingan hasil simulasi dan teori analitik penapis APCMRR	89
5.5	Faktor kawalan dan aras	91
5.6	Susunatur eksperimen menggunakan OA L <sub>9</sub>	91
5.7	Nilai dan SNR pengoptimasian rekabentuk bagi IL penapis MRR tunggal	92
5.8	Nilai dan SNR pengoptimasian rekabentuk bagi Q penapis MRR tunggal	93
5.9	Sambutan SNR bagi IL bagi setiap CF bagi pengoptimasian penapis MRR tunggal	94
5.10	Sambutan SNR bagi Q bagi setiap CF bagi pengoptimasian penapis MRR tunggal	94
5.11	Penetapan terbaik rekabentuk penapis MRR tunggal bagi pengoptimasian IL dan Q	96
5.12	Peratusan sumbangan parameter rekabentuk ke atas IL dan Q bagi penapis MRR tunggal	97
5.13	Hasil perbandingan nilai IL dan Q penapis MRR tunggal setelah proses optimasi	98

5.14	Nilai dan SNR pengoptimasian rekabentuk bagi IL penapis SPCMRR	100
5.15	Nilai dan SNR pengoptimasian rekabentuk bagi Q penapis SPCMRR	100
5.16	Sambutan SNR bagi IL bagi setiap CF bagi pengoptimasian penapis SPCMRR	100
5.17	Sambutan SNR bagi Q bagi setiap CF bagi pengoptimasian penapis SPCMRR	101
5.18	Penetapan terbaik rekabentuk penapis SPCMRR bagi pengoptimasian IL dan Q	102
5.19	Peratusan sumbangan parameter rekabentuk ke atas IL dan Q bagi penapis SPCMRR	103
5.20	Hasil perbandingan nilai IL dan Q penapis SPCMRR setelah proses optimasi	103
5.21	Nilai dan SNR pengoptimasian rekabentuk bagi IL penapis APCMRR	105
5.22	Nilai dan SNR pengoptimasian rekabentuk bagi Q penapis APCMRR	105
5.23	Sambutan SNR bagi IL bagi setiap CF pengoptimasian penapis APCMRR	106
5.24	Sambutan SNR bagi Q bagi setiap CF pengoptimasian penapis APCMRR	106
5.25	Penetapan terbaik rekabentuk penapis APCMRR bagi pengoptimasian IL dan Q	108
5.26	Peratusan sumbangan parameter rekabentuk ke atas IL dan Q bagi penapis APCMRR	108
5.27	Hasil perbandingan nilai IL dan Q bagi penapis APCMRR setelah proses optimasi	109
5.28	Rumusan prestasi penapis MRR tunggal, penapis SPCMRR dan penapis APCMRR setelah proses pengoptimasian	111
5.29	Perbandingan prestasi penapis APCMRR dengan beberapa jenis penapis MRR yang lain	111
5.30	Nilai parameter piawai proses pemfabrikasian SOI	112

	menggunakan RIE	
5.31	Perbezaan jangkaan prestasi MRR hasil proses pemfabrikasian	120
6.1	Hasil perincian keputusan OSA dan penganalisa WDM	130
6.2	Parameter-parameter tipikal system WDM 8 saluran	131
6.3	Perbandingan hasil kajian bagi pelbagai jenis penapis MRR	138
6.4	Perbandingan prestasi beberapa jenis penapis optik di dalam rangkaian WDM 8 saluran	138
6.5	Pekali gandaan pada nilai BER yang berbeza	142

## SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
1.1	Perbandingan lebar jalur di antara domain elektronik dan fotonik	3
1.2	Carta alir skop kajian	7
1.3	Kerangka penulisan tesis	10
2.1	Satah jeriji	13
2.2	Interferometer Fabry- Perot	13
2.3	(a) Peranti Jeriji Pandu Gelombang Tersusun (AWG) (b) konfigurasi skematik penyahmultipleks AWG	15
2.4	Jeriji gentian Bragg	16
2.5	Interferometer Mach-Zehnder (MZI)	16
2.6	Gambarajah skematik sistem WDM	19
2.7	Format pengekodan data di dalam sistem komunikasi optik	21
2.8	Contoh format pengekodan NRZ teknik modulasi kutub	21
2.9	(a) Gambarajah skematik MRR bersama MZI (b) gambar foto SEM MRR berstruktur tangga (c) gambar foto SEM tiga MRR disusun secara sesiri dan (d) gambar foto SEM MRR diintegrasikan bersama pengganding berarah	24
2.10	Gambarajah skematik MRR (a) pandangan atas dan (b) keratan rentas dari A ke B	26
2.11	(a) Contoh simulasi MRR pada keadaan tidak tersalun (b) tersalun dan (c) contoh spektrum isyarat penghantaran MRR	27
2.12	Contoh penentuan FSR dan FWHM melalui spektrum keluaran MRR diukur pada liang gugur	29
2.13	Konfigurasi peranti mikropenyalaun secara (a) mikrocakera (b) trek litar lumba (c) gandaan selari (d) gandaan sesiri	30
2.14	Gambarajah skematik jalur alur elektron EBL	34
2.15	Proses punaran kering	36

2.16	Gambarajah skematik sistem laser cetakan terus	37
2.17	Gambarajah skematik pandangan atas dan keratan rentas bagi konfigurasi MRR (a) lateral dan (b) vertikal	39
3.1	Carta alir metodologi kajian	41
3.2	(a) Carta alir dan (b) gambarajah skematik proses pemfabrikasian MRR menggunakan RIE	48
4.1	Proses pemodelan matematik secara analitik peranti MRR	51
4.2	Gambarajah struktur pandu gelombang tiga lapisan yang memaparkan taburan medan elektrik pada arah $x$ dengan tiga mod	53
4.3	Mod genap (garisan hitam) dan mod ganjil (garisan berbintik) di dalam pandu gelombang lima lapisan	54
4.4	Ilustrasi pengganding berarah dan unit pelengah bagi konfigurasi MRR	57
4.5	(a) Gambarajah skematik peranti MRR bertertib tinggi susunan selari simetri (SPCMRR) dan (b) perwakilan blok binaan matriks pemindahan penapis SPCMRR	60
4.6	GUI menggunakan perisian MATLAB	62
4.7	Profil mod asas pandu gelombang MRR untuk setiap komponen medan elektrik dan medan magnet	64
4.8	Kesan variasi jarak jurang dan lebar pandu gelombang terhadap (a) $n_{eff}$ dan (b) pekali gandingan	65
4.9	Spektrum transmisi penapis MRR	66
4.10	IL dan Q pada jarak jurang yang berbeza	67
4.11	Kesan variasi lebar pandu gelombang terhadap IL dan Q	68
4.12	Spektrum transmisi penapis MRR pada $R = 6 \mu\text{m}$ , $8 \mu\text{m}$ , $10 \mu\text{m}$ , $12 \mu\text{m}$ yang diukur pada pandu gelombang bas keluaran liang gugur	69
4.13	Kesan variasi $R$ terhadap IL dan Q	70
4.14	Spektrum transmisi penapis MRR pada tertib pertama, kedua dan ketiga	72
4.15	Nilai IL dan ER pada tertib pertama, kedua dan ketiga yang diukur pada keluaran liang gugur	73

4.16	(a) Rekabentuk penapis MRR susunan selari tidak simetri yang terdiri daripada tiga mikrogegelang berlainan saiz jejari (b) perwakilan blok binaan matriks pemindahan penapis APCMRR	74
4.17	Gambarajah skematik pandu gelombang bengkok	75
4.18	Spektrum sambutan APCMRR dan SPCMRR	78
5.1	(a) Perambatan cahaya di dalam pandu gelombang lurus (b) Profil mod optik pandu gelombang peranti MRR tunggal	83
5.2	(a) Keadaan tersalun dan (b) keadaan tidak tersalun penapis MRR	83
5.3	Spektrum transmisi penapis MRR tunggal daripada simulasi	84
5.4	Hasil simulasi kesan variasi $g$ terhadap (a) IL dan (b) Q	86
5.5	Hasil simulasi kesan variasi $W$ terhadap (a) IL dan Q	87
5.6	Hasil simulasi kesan variasi $R$ terhadap (a) IL dan (b) Q	88
5.7	Carta alir proses pengoptimasian rekabentuk MRR	90
5.8	Plot kesan utama pengoptimasian IL bagi penapis MRR tunggal	95
5.9	Plot kesan utama pengoptimasian Q bagi penapis MRR tunggal	95
5.10	Graf peningkatan prestasi penapis MRR tunggal dari segi (a) IL dan (b) Q	99
5.11	Plot kesan utama pengoptimasian IL bagi penapis SPCMRR	101
5.12	Plot kesan utama pengoptimasian Q bagi penapis SPCMRR	102
5.13	Graf peningkatan prestasi penapis SPCMRR dari segi (a) IL dan (b) Q	104
5.14	Plot kesan utama pengoptimasian IL bagi penapis APCMRR	107
5.15	Plot kesan utama pengoptimasian Q bagi penapis APCMRR	107
5.16	Graf peningkatan prestasi penapis APCMRR dari segi (a) IL dan (b) Q	110

5.17	Rekabentuk penapis MRR menggunakan perisian AutoCAD 2013 untuk topeng litografi	113
5.18	Gambar SEM permukaan sampel pertama pada (a) keseluruhan corak MRR, (b) bahagian bertanda A pada Rajah 5.18 (a) dan (c) bahagian bertanda B pada Rajah 5.18 (a)	115
5.19	Gambar SEM permukaan sampel pertama bahagian A pada Rajah 5.18 (a) yang telah diperbesarkan dengan skala 5000x	116
5.20	Gambar SEM permukaan sampel kedua MRR pada (a) keseluruhan corak MRR dan (b) bahagian bertanda A pada Rajah 5.20 (a)	117
5.21	Gambar SEM (a) keratan rentas pandu gelombang MRR, (b) pandangan sisi pandu gelombang MRR dan (c) sebahagian pandu gelombang lurus yang runtuh	118
5.22	Gambar FESEM hasil pemfabrikasian menggunakan EBL bagi (a) permukaan substrat di antara pandu gelombang lurus dan pandu gelombang mikrogegelang (b) permukaan atas keseluruhan penapis MRR tunggal dan (c) keratan rentas pandu gelombang lurus	119
5.23	(a) Jangkaan profil mod pandu gelombang dan (b) sambutan spektrum penapis MRR pada liang gugur	120
6.1	Contoh cip litar bersepadu optik membawa isyarat pada kadar data 10 Gbps di mana penapis optik digunakan sebagai pemisah panjang gelombang	124
6.2	Gambarajah skematik sistem komunikasi optik bagi penghantaran data digit	125
6.3	Tetapan sistem penghantaran sistem WDM dengan 8 saluran menggunakan Optisystem	127
6.4	Hasil pengukuran daripada OSA (a) sebelum penapis APCMRR dan (b) selepas penapis APCMRR	129
6.5	Sistem WDM 8 saluran dengan jarak saluran 200 GHz	131
6.6	Gambarajah mata bagi sistem WDM 8 saluran dengan panjang gentian optik (a) 50 km, (b) 100 km, (c) 150 km dan (d) 200 km	132
6.7	Graf (a) BER dan (b) faktor- $Q_{\text{sis}}$ pada kuasa penghantaran	133



	yang berbeza dan panjang talian 20 km	
6.8	BER dan faktor- $Q_{\text{sis}}$ melawan jarak bagi pelbagai jumlah saluran	135
6.9	BER dan (b) faktor- $Q_{\text{sis}}$ melawan jarak bagi kadar data berbeza	136
6.10	Kuasa di penerima melawan kuasa yang dibekalkan pada talian penghantar	137
6.11	Rajah 6.11 Gambarajah fenomena ketar masa	139
6.12	Pecahan ketar masa	140
6.13	(a) Gambarajah mata ideal dan (b) penentuan ketar masa melalui gambarajah mata	142
6.14	Tetapan sistem penghantaran isyarat optik bagi mengujian ketar masa menggunakan simulasi Optisystem	143
6.15	Gambarajah mata dengan kehadiran (a) 0 UI (b) 0.2 UI (c) 0.4 UI (d) 0.6 UI (e) 0.8 UI dan (f) 1 UI ketar masa	144
6.16	Nilai jumlah ketar masa, ketar berketentuan dan ketar rawak sistem WDM 8-saluran untuk BER berlainan.	145

## SENARAI SIMBOL

$a$	separuh lebar pandu gelombang
$d$	jarak di antara dua cermin selari
$D$	jarak pemisahan pusat ke pusat pandu gelombang
$E$	vektor medan elektrik
$E_{e(x)}$	medan elektrik mod genap
$E_{o(x)}$	medan elektrik mod ganjil
$E_{1(x)}$	amplitud medan elektrik di dalam pandu gelombang pertama
$E_{2(x)}$	amplitud medan elektrik di dalam pandu gelombang kedua
$g$	saiz jurang
$h$	kedalaman punaran
$H$	tinggi pandu gelombang
$j$	jarak di antara dua alur kecil satah jeriji
$J$	jarak pusat ke pusat di antara dua mikrogegelang bersebelahan
$J_n$	jarak pusat ke pusat di antara dua mikrogegelang bersebelahan bernombor $n$
$JT_{pp}$	Jumlah ketar masa keseluruhan
$JD_{pp}$	Jumlah ketar masa berketentuan
$JR_{pp}$	Jumlah ketar masa rawak
$L$	lilitan mikrogegelang
$L_c$	panjang gandingan
$L_{eff}$	panjang efektif gegelang
$L_p$	jarak pandu gelombang menyambungkan dua pandu gelombang lurus
$n$	jumlah eksperimen
$n_\sigma$	faktor gandaan ketar masa

$N$	jumlah mikrogegelang
$m$	peringkat salunan
$m_{xj}$	jumlah SNR bagi faktor $x$
$M_R$	transmisi mikrogegelang
$M_A$	perambatan fasa daripada satu MRR ke MRR yang lain
$M_{Jn}$	matriks umum perambatan kuasa penapis APCMRR
$n_{clad}$	indeks biasan salutan pandu gelombang
$n_{core}$	indeks biasan teras pandu gelombang
$n_{eff}$	indeks biasan efektif
$n_g$	indeks biasan kumpulan
$P$	Transmisi pengganding berarah
$P_{coup}$	kuasa terganding ke dalam pandu gelombang
$P_{masuk}$	kuasa masukan
$P_{gugur}$	kuasa pada liang gugur
$P_{pintas}$	kuasa pada liang pintas
$Q$	lengahan fasa optik dan kehilangan pandu gelombang
$r$	vektor jejari
$R$	jejari mikrogegelang
$R_l$	jejari lengkung
$R_n$	jejari mikrogegelang bernombor $n$
$R_n$	jejari mikrogegelang bernombor $n$
$SST$	jumlah kuasa dua SNR setiap eksperimen
$SSF(x)$	jumlah kuasa dua SNR bagi setiap faktor $x$
$t$	pekali penghantaran

$W$	lebar pandu gelombang
$y_i$	nilai faktor-Q bagi setiap eksperimen bernombor i
$Y_1$	nilai IL bagi eksperimen 1
$Y_n$	nilai IL bagi eksperimen bernombor n
$\Delta_{neff}$	perbezaan indeks biasan teras dan indeks biasan salutan
$\theta$	sudut pantulan
$\alpha_b$	pekali pelemahan yang menyebabkan kehilangan isyarat di dalam pandu gelombang bengkok
$\alpha_m$	rosotan perambatan bernombor m
$\alpha_n$	rosotan perambatan bernombor n
$\alpha_{wb}$	rosotan perambatan di dalam pandu gelombang bengkok
$\beta_e$	pekali perambatan mod genap
$\beta_o$	pekali perambatan mod ganjil
$\beta_{bas}$	pekali perambatan pandu gelombang bas
$\beta_{basb}$	pekali perambatan pandu gelombang bengkok
$\kappa$	pekali gandingan
$\kappa_{in}$	pekali gandingan daripada pandu gelombang mikrogegelang ke pandu gelombang bas keluaran
$\kappa_{mn}$	pekali gandingan bernombor mn
$\kappa_n$	pekali gandingan bernombor n
$\kappa_{out}$	pekali gandingan daripada pandu gelombang bas masukan ke pandu gelombang mikrogegelang
$\eta_{besar}$	SNR bagi ciri lebih besar, lebih baik
$\eta_{kecil}$	SNR bagi ciri lebih kecil, lebih baik
$\tau$	pelemahan medan
$\rho_F$	peratusan sumbangan

$\chi_{mn}$	kehilangan lebih bernombor mn
$\chi_n$	kehilangan lebih bernombor n
$\lambda_n$	panjang gelombang bernombor n
$\lambda_o$	panjang gelombang salunan
$\lambda_1$	panjang gelombang pertama
$\lambda_2$	panjang gelombang kedua
$\omega$	frekuensi radian
$\Lambda$	jarak di antara dua mikrogegelang bersebelahan
$\Delta$	Perbezaan di antara nilai SNR maksimum dan SNR minimum

## SENARAI SINGKATAN

SINGKATAN	NAMA PENUH
ADSL	Talian Pelanggan Digital Tidak Simetri
ANOVA	Analisis Varians
APCMRR	Penyalun Mikrogelang Susunan Selari Tidak Simetri
APF	Penapis Jalur Lulus Optik
AR	Autograsi
AWG	Jeriji Pandu Gelombang Tersusun
BER	Kadar Ralat Bit
BOE	Punaran Oksida Pemampam
BW	Lebar Jalur
CF	Faktor Kawalan
CMT	Teori Mod Terganding
CMOS	Semikonduktor Pelengkap logam-oksida
CROW	<i>Coupled Resonator Optical Waveguide</i>
CW	Laser Gelombang Selanjara
Demux	Penyahmultipleks
EBL	Litografi Sinar Elektron
EDP	<i>Thylenediamine-Pyrocatechol</i>
ER	Nisbah Kepupusan
FBG	Jeriji Gentian Bragg
FDTD	Perbezaan Terhingga Domain Masa
FESEM	Mikroskop Pengimbas Elektron Pancaran Medan
FHA	Analisa Harmonik Pantas
FIR	Sambutan Dedenyut Terhingga
FSR	Spektral Julat Bebas
FTTH	Talian Gentian ke Rumah
FWHM	Lebar Penuh pada Separuh Maksimum

GaAs	Galium Arsenik
GUI	Grafik Perantaramuka Pengguna
He-Cd	Helium-Kadmium
HIC	Perbezaan Indeks Biasan Besar
ICP	Plasma ditambah Secara Induktif
IL	Kehilangan Sisipan
IIR	Sambutan Dedenyut Tidak Terhingga
InGaAsP	Indium Galium Arsenid Fosfurik (InGaAsP)
ITU-T	<i>International Telecommunications Union- Telecommunications</i>
KOH	Kalium Hidroksida
LC	Cecair Kristal
LDWS	Sistem Cetakan Laser Terus
MA	Bergerak Purata
MIK	Mikroskop
MON	Monitor
MRR	Penyalun Mikrogelang
Mux	Pemultipleks
MZI	Interferometer Mach- Zender
NA	Bukaan Berangka
NRZ	Non Return Zero
OADM	Pemultipleks Optik Tambah- Gugur
OPM	Meter Kuasa Optik
OSA	Penganalisa Spektrum Optik
PC	Komputer Peribadi
PIC	Photonic Integrated Circuit
PLC	Litar Gelombang Cahaya Planar
PRBS	Penjana Jujukan Bit Rawak
Q	Faktor Kualiti
Q <sub>sis</sub>	Faktor Kualiti Sistem

RF	Frekuensi Radio
RIE	<i>Reactive Ion Etching</i>
SEM	Mikroskop Pengimbas Elektron
SiO <sub>2</sub>	Silikon Dioksida
SiON	Silikon OksiNitrik
SNR	Nisbah Isyarat Kepada Hingar
SOI	Silikon-di atas-Penebat
SPCMRR	Penyalun Mikrogelang Susunan Selari Simetri
TE	Elektrik Melintang
TIE	Ralat Selang Masa
TFF	Penapis Filem Nipis
TLS	Sumber Laser Boleh Ubah
TMM	Fungsi Pemindahan Matriks
UI	Unit Selang
UV	Ultraungu
VLSI	Integrasi Berskala Sangat Besar
WDM	Pemultipleks Pembahagian Panjang Gelombang
WGR	Penghala Pandu Gelombang Berjeriji